

O SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA HISTÓRIA EVOLUTIVA DE  
PARTE DO TERRITÓRIO MINEIRO

Marx Prestes Barbosa  
Instituto de Pesquisas Espaciais  
Secretaria Especial da Ciência e Tecnologia  
Laboratório Associado de Sensoriamento Remoto  
Av. Aprígio Veloso, 882 - Bodocongó  
58100 - Campina Grand - PB  
BRASIL

RESUMO

O presente trabalho teve como enfoque principal o estudo fotogeológico regional, com o objetivo de contribuir para o conhecimento da história evolutiva da região do Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e adjacências. Na análise dos dados de fotointerpretação, do reconhecimento de campo, da geofísica (aeromagnetometria e aerocintilometria) e da bibliografia, foram determinadas seis direções preferenciais de esforço, levando-se em consideração que os principais alinhamentos e zonas fortemente estruturadas, são reflexos de estruturas maiores em profundidade. Relacionados com estes esforços estão movimentos rotacionais, que provocaram o deslissamento gravitacional dos sedimentos Minas, de seu lugar de origem, para as áreas por eles hoje ocupadas. A análise fotogeológica, aliada ao estudo de campo, permitiu estender de maneira contínua o supergrupo Rio das Velhas, para oeste do Quadrilátero Ferrífero.

ABSTRACT

The present regional photogeological study was based on the interpretation of low resolution images. The principal aim was to contribute to the knowledge of the evolutionary history of the region of the Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional and adjacent parts. In the analysis of photointerpretation, existing literature and field and geophysical data, six structural directions of efforts were determined, considering that the principal lineaments and strongly structured zones are reflex of deeper structures. All this six preferential directions of efforts are related to rotational movements, that moved by gravitational slipping the Minas sediments, from their original places to their recent areas in the Quadrilátero Ferrífero. The more important result of the photogeological analysis and field works was the continuous traced of the limits of Rio das Velhas Super-group to the west part of the Quadrilátero Ferrífero.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos dos complexos pré-cambrianos baseiam-se principalmente em divisões estratigráficas locais. Ao mesmo tempo os estudos integridos e de compilação do pré-cambriano têm um grande interesse científico e um significado prático fundamental, pois a separação e correlação regional e interregional de suas formações e de seus conjuntos litoestruturais maiores, apresentam chaves importantes no entendimento da história evolutiva da crosta terrestre e muito contribuem quanto a distribuição e a potencialidade dos recursos minerais possivelmente relacionados.

Duas das principais áreas do pré-cambriano brasileiro sob estudos geológicos e metalogenéticos há mais de 200 anos, devido as riquezas minerais, são o Quadrilátero Ferrífero e o Espinhaço Meridional e adjacências. Para estas regiões têm sido desenvolvidos levantamentos cartográficos, aerofotográficos, geofísicos e mapeamentos geológicos diversos, mas sempre de caráter descontínuo, em escalas diferentes e mu-

tas vezes com resultados contraditórios.

A utilização de produtos de sensoriamento remoto de baixa resolução tem se mostrado uma ferramenta importante nos estudos geológicos regionais que procuram a partir de trabalhos pré-existentes (incluindo-se aqui todos os levantamentos cartográficos, complementados com verificação de campo) uma homogenização e integração das informações, principalmente em relação as estruturas tectônicas de caráter rúptil e as continuidades de conjuntos litológicos.

O presente trabalho procura retratar os resultados obtidos pelo autor na aplicação, principalmente de produtos de sensoriamento remoto orbital, no estudo geológico-estrutural. O direcionamento do trabalho para questões tectono-estruturais é devido as características dos produtos utilizados, que permitem uma visão regional bastante clara de grandes lineamentos desenvolvidos principalmente em decorrência da tectônica rúptil.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo principal o estudo da história evolutiva da região do Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e áreas adjacentes, através da utilização de produtos de sensoriamento remoto de baixa resolução, integrados aos dados geofísicos, de campo e bibliográficos.

## 3. GEOLOGIA DA ÁREA E SUAS CARACTERÍSTICAS FOTOGEOLOGICAS

A área de estudo deste trabalho engloba:

- rochas do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais (Inda et alii, 1984),
- depósitos de caráter vulcano-sedimentar dos supergrupos Rio Paraúna e Rio das Velhas.

Todo este conjunto de rochas é considerado como pertencente ao Arqueano Indiviso.

As rochas do Proterozóico Inferior a Médio estão representadas pelos supergrupos Minas e Espinhaço e as rochas do supergrupo São Francisco representam o Proterozóico Superior. O Fanerozóico está representado pelos basaltos Mesozóicos e coberturas aluvio-coluvionares do Terciário e Quaternário.

### 3.1 - COMPLEXO MIGMATITO-GRANULÍTICO DE MINAS GERAIS

As rochas deste complexo caracterizam-se por uma evolução complexa policíclica com orogêneses pré-cambrianas superimpostas e reativações fanerozóicas. Através de produtos de sensores remotos, trabalhos de campo e dados bibliográficos, foram individualizados conjuntos litotestruturais com predominância de certos tipos litológicos, de maneira semelhante a adotada por Fontes et alii, 1978.

#### - Unidade com predominância de granulitos

Ocorre na porção leste da área de estudo, faixas de direção NS, intercaladas com as unidades com predominância de gnaisses e migmatitos e de granitoides e migmatitos homogêneos. O contato com as unidades intercaladas, as vezes é tectônico, por falhas de empurrão de alto ângulo, as vezes é gradual.

#### - Unidade com predominância de granitoides e migmatitos homogêneos

Existem duas áreas de ocorrência desta unidade. A primeira, em uma única faixa de direção NS, na região a leste do Rio Doce, e a segunda ocupa uma área muito grande, a oeste do mesmo rio, que se estende desde o Quadrilátero Ferrífero, ao longo da borda leste da Serra do Espinhaço, até além dos limites da área de estudo, para o norte. Os contatos com as outras unidades são tectônicos ou gradacionais pelo aumento da migmatização e granitização. Uma das características desta unidade é a presença de allanita que é um dos indicadores da origem dos granitoides.

#### - Unidade com predominância de gnaisses e migmatitos

Esta é a unidade de maior ocorrência, ser

vindo de embasamento às rochas do Quadrilátero Ferrífero e metassedimentos dos supergrupos Minas, Espinhaço e São Francisco. Relacionados a esta unidade encontramos um grande número de diques básicos (?) a ácidos, que são observados a oeste do Quadrilátero Ferrífero, e a sudeste da serra do Espinhaço. É marcante a presença de diques de quartzitos de direção NS, com variações para NE e NW. É importante salientar a presença de gnaisses-conglomeráticos, que segundo Naqui et alii (1980, in Condie, 1981) são importantes no estudo do Arqueano, pois estipulam evidências diretas do processo sedimentar no Arqueano. Este fato e mais a presença da allanita nas rochas desta unidade, vem reforçar a idéia de alguns autores sobre a origem sedimentar dos gnaisses cinzentos.

#### - Unidade com predominância de gnaisses e xistos

Ocorre na parte leste da área de estudo e se estende ao longo do vale do Rio Doce de Sul para Norte. Associada a ela encontram-se vários corpos pegmatíticos, alguns com interesse econômico em pedras semi-preciosas.

#### - Unidade com predominância de gnaisses e quartzitos

De ocorrência restrita, está representada por uma estreita faixa de direção N-NE. Os contatos com a unidade com predominância de gnaisses e migmatitos são tectônicos por falha de empurrão de alto ângulo.

As principais características fotogeológicas que permitiram a individualização das rochas do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais foram:

- *Diferenciação morfológica* - caracterizada principalmente pelo seu aspecto estrutural imposto pelo bandamento de suas rochas (principalmente pela presença dos gnaisses bandados) marcante nas imagens LANDSAT e de radar. As lineações de relevo e drenagem neste complexo apresentam-se às vezes de uma maneira caótica, ou às vezes fortemente estruturadas em direções bem definidas. Esta forte estruturação em direções definidas destes elementos é que permitiu a identificação dos grandes falhamentos.

Na definição das unidades deste complexo levou-se muito em consideração as variações morfológicas acentuadas, que posteriormente foram observadas em campo e relacionadas com as unidades fotointerpretadas. As áreas de predominância de granitoides apresentam variações morfológicas grandes, com cristas alongadas, formando às vezes estruturas tipo pão-de-açúcar, entre vales profundos. As unidades com predominância de granulitos já não apresentam variações morfológicas tão acentuadas e as áreas de gnaisses e xistos são as mais calmas do ponto de vista morfológico, pois estão sujeitas a uma erosão mais homogênea.

- *Diferenciação de tonalidade de cinza* - quando se trata do uso de produtos multiespectrais, como as imagens MSS e TM, as diferenças de tonalidades nos produtos fotográficos é importante. Ela resulta da cobertura vegetal, do teor de umidade, etc., bem registrados nos

canais do visível, principalmente no 5 do MSS e no 3 do TM, que quando aliada ao fator morfológico melhor nos permite definir as unidades litoestratigráficas que nos interessam. Por exemplo a oeste de Coronel Fabriciano as áreas com predominância de granitoides, formam morros elevados, por conseguinte, caracterizam áreas com teor de umidade maior e uma vegetação natural mais exuberante. Este dado aliado ao fator morfológico (relevo fortemente dissecado) permitiu separar os granitoides das áreas de predominância de gnaisses e migmatitos, que ocupam regiões morfológicamente mais arrasadas, com uma vegetação natural menos exuberante, que estão representadas nos canais do visível por tonalidades mais claras. Outro exemplo, são os diques de quartzitos estudados por Sperber (1975) a NE de Belo Horizonte, na região de Taquaraçu de Minas, que são identificados por suas características fotogeológicas (pares luz-sombra), principalmente impostas pelo relevo.

### 3.2 - SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

Está representado pelos grupos Quebra-Osso (Schorsch, 1975), Nova Lima e Maquiné (Dorr et alii, 1957).

#### - Grupo Quebra Osso

Consiste de uma sequência inferior ultramáfica, com textura/estrutura "spinifex", por lavas brechadas, afaníticas, devitrificadas, raras vezes vesiculares, almofadadas, maciças e intercalações (lentes?) de formação ferrífera do tipo algoma, com níveis grafitosos e silicosos.

#### - Grupo Nova Lima

Está representado por uma sequência vulcanoclástica com intercalações de sedimentos químicos, como formações ferríferas do tipo algoma e dolomitos, além de vulcânicas máficas intermedárias a (?) ácidas.

#### - Grupo Maquiné

De ocorrência muito restrita na área de estudo, está representado por sercicita e cloritaxistos.

As rochas do supergrupo Rio das Velhas apresentam no geral características fotogeológicas distintas do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais, na região do Quadrilátero Ferrífero. Possuem também um relevo movimentado, como aquele complexo, mas caracterizado por cristas contínuas e mais alongadas, orientadas principalmente para NW e as vezes para EW, intercaladas por vales não muito profundos. A sua tonalidade nos canais do infravermelho próximo (canais 7 do MSS e 4 do TM) é cinza médio. Estão também caracterizadas morfológicamente através do elemento fotointerpretativo assimetria de relevo, que na maioria das vezes apresenta-se fortemente assimétrico.

Na região de Juatuba-Pitangui, caracteriza-se por um relevo mais plano, mais arrasado, em relação ao Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais, excetuando as serras de Boa Vista, Alegria, do Rio do Peixe, Grande, dos Correias, dos Ferreiras, do Antunes e Conceição do Pará. Porém a sua característica fotogeológica mais marcante é a estruturação de suas lineações de relevo e drenagem para NW.

A partir destas características fotogeológicas, e da análise dos mapas cintilométricos e aeromagnetométricos e de observações de campo, foi possível traçar um contato contínuo entre as rochas do supergrupo Rio das Velhas e o embasamento cristalino, desde a região do Quadrilátero Ferrífero até a região de Pequi-Pitangui, através de uma estreita faixa de ocorrência desse supergrupo na região de Sítio Novo, entre as cidades de Juatuba e Pará de Minas.

### 3.3 - SUPERGRUPO RIO PARAÚNA

De distribuição restrita, ocorre no extremo norte da área de estudo, na região a oeste de Itacolomi. É uma sequência constituída de xistos verdes, metatufos, sercicita xistos, itabiritos, quartzo-xistos, quartzitos ferruginosos, quartzitos róseos e metaconglomerados monomíticos.

O supergrupo Rio Paraúna foi individualizado somente pelas suas propriedades fotolitológicas: relevo pouco dissecado, estruturado para NW e tonalidade cinza médio.

### 3.4 - UNIDADE METAULTRAMÁFICA

Esta unidade, considerada também de idade Arqueana, possivelmente correlacionável com os supergrupos Rio das Velhas e Rio Paraúna, foi delimitada no extremo norte da área de estudo, a leste de Conceição do Mato Dentro e a sul da cidade de Itabira, na parte central da área de trabalho. Apresenta características espectrais bem definidas: tonalidades escuras nos canais do visível do MSS e do TM e tonalidades de cinza claro nos canais do infravermelho próximo, e um relevo bastante dissecado.

### 3.5 - PROTEROZOICO INFERIOR A MÉDIO

#### 3.5.1 - SUPERGRUPO MINAS

Está representado por uma unidade indivisa basal (xistos verdes e paragnaisses); por uma sequência itabirítica indivisa a leste de Morro do Pilar; por quartzitos conglomeráticos e filitos do Grupo Caraça; por itabiritos, dolomitos, filitos e vulcânicas básicas intermediárias e (?) ácidas do grupo Itabira; e finalmente por filitos e xistos prateados do grupo Piracicaba.

As rochas do supergrupo Minas, no Quadrilátero Ferrífero, caracterizam-se por aspectos fotogeológicos bem distintos dos apresentados pelo Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais e pelas rochas do supergrupo Rio das Velhas. Apresentam-se topograficamente mais elevadas, com declives acentuados das encostas, que possuem intercalações de vales profundos e cristas altas de direção NW. As cristas principais, que se estendem por dezenas de quilômetros, possuem direção NE. Outro fator marcante é a forte estruturação das lineações também de direção NE. Em termos de tonalidades nos canais do visível do MSS e TM, apresentam-se as vezes com tonalidades de cinza escuro e as vezes cinza médio para as unidades itabiríticas. Nos canais do infravermelho próximo do MSS e do TM, as sequências itabiríticas apresentam-se mais escuras, devido à absorção do ferro.

Para a sequência do supergrupo Minas na região de Santa Maria de Itabira, a principal característica fotogeológica é a forte estrutura-

ção dos elementos de relevo e de drenagem segundo a direção NNE, bem acentuada nos canais 4 do TM e 7 do MSS e nos mosaicos semi-controlados de radar. A sequência Itabirítica Indiferenciada da região de Morro do Pilar caracteriza-se por escarpas abruptas com a superfície inclinada para NE e para E e pela forte estruturação dos elementos de relevo e drenagem na direção NW e pela sua disposição arqueada para SW e S, na região a leste de Morro do Pilar.

### 3.5.2 - SUPERGRUPO ESPINHAÇO

Está representado por quartzitos e conglomerados com "metachert" e conglomerados localmente diamantíferos do fácies Altamira, todos pertencentes a formação Sopa Brumadinho; por quartzitos finos, micáceos, constantemente cortados por corpos básicos intrusivos da formação Galho do Miguel; por metassiltitos laminados e filitos quartzosos e quartzitos sericíticos da formação Santa Rita; por quartzitos finos, micáceos, com metabrechas intraformacionais da formação Corrego dos Borges e por filitos, siltitos e intercalações lenticulares de quartzitos da formação Corrego da Bandeira.

As rochas do supergrupo Espinhaço possuem características fotogeológicas distintas.

A formação Sopa Brumadinho foi discriminada a partir de suas fortes características fotogeológicas: relevo e tonalidade de cinza, apesar de sua restrita ocorrência na área de estudo.

A formação Galho do Miguel, de maior expressão na área do trabalho, tem propriedades fotogeológicas bem marcantes: relevo fortemente estruturado para NNW, e tonalidade de cinza médio nos canais do visível do MSS e do TM.

A Formação Santa Rita caracteriza-se principalmente por zonas mais arrasadas em termos de relevo, pois suas rochas são menos resistentes a erosão. Esta propriedade fotolitológica, aliada a tonalidade de cinza, permitiu que esta formação fosse individualizada sem maiores problemas.

As formações Corrego dos Borges e Corrego da Bandeira, ambas de ocorrência restrita na área de estudo, foram individualizadas somente por suas tonalidades de cinza.

### 3.6 - PROTEROZOICO SUPERIOR

#### 3.6.1 - SUPERGRUPO SÃO FRANCISCO

Ocupa grande parte da região a oeste da serra do Espinhaço e está representado por conglomerados, quartzitos, metagrauvas, filitos, siltitos, filitos e xisto verde do grupo Macaúbas e por ardósias, metassiltitos, folhelhos, arcóseas, quartzitos, margas e calcários do subgrupo Paraopeba Indiviso; calcários de diversos tipos com intercalações de ardósias e siltitos da formação Sete Lagoas; ardósias folhelhos, argilitos, com finas intercalações de calcário da formação Santa Helena; e por calcários oolíticos e maciços, intercalados com siltitos e ardósias da Formação Lagoa do Jacaré. Todo este conjunto de rochas está englobado no subgrupo Paraopeba do grupo Bambuí.

O grupo Macaúbas, que ocorre em uma estreita faixa ao longo da borda oeste da serra do ES

Espinhaço, a partir da região de Santana do Riocho para norte, e nos produtos utilizados as propriedades fotolitológicas não mostraram aspectos que o pudesse subdividir nas três formações propostas por Karfunkel e Karfunkel (1977): Califorme, Terra Branca e Carbonita, que correspondem às unidades A, B e C de Hettich (1976).

Pela fotointerpretação, somente foi possível individualizar uma unidade Indivisa, que possui contatos tectônicos com as rochas do grupo Bambuí e do Supergrupo Espinhaço, por falhas de empurrão de alto ângulo de fácil identificação nos produtos LANDSAT e de radar.

O subgrupo Paraopeba Indiviso, nas imagens LANDSAT e de radar é bem definido devido a sua textura rugosa, em decorrência do intenso fraturamento de suas rochas. Caracteriza-se pelas propriedades fotolitológicas representadas por um relevo movimentado e fortemente estruturado para N e NW, pela rede de drenagem e por um grande número de lagos de diversos tamanhos, associados a sua área de ocorrência.

As principais características fotolitológicas da formação Sete Lagoas é dada pelo relevo. As características fotolitológicas da formação Serra de Santa Helena são dadas pelo relevo característico dos calcários da região, que se apresentam sempre elevados no terreno, devido a sua maior resistência a erosão, pela drenagem e pela tonalidade de cinza. Já a formação Lagoa do Jacaré, caracteriza-se por um relevo mais plano e por uma tonalidade de cinza médio, porém mais homogênea.

### 3.7 - ROCHAS MAGMÁTICAS

As rochas basálticas pós-tectônicas foram identificadas a partir da compilação bibliográfica e dados fotolitológicos das imagens de radar e LANDSAT. Os anfibolitos que ocorrem principalmente entre Rio Piracicaba e Itabira e a oeste de Caeté, foram separados nas imagens de radar e LANDSAT pelas suas formas de relevo. Os metadioritos e os metaquartzodioritos foram identificados com base nos dados bibliográficos e de fotointerpretação. As rochas metaeruptivas /eruptivas básicas a intermediárias pré- e pós-tectônicas foram identificadas principalmente por suas características espectrais: tonalidade cinza escuro nos canais do visível do MSS e TM, e cinza claro nos canais do infravermelho próximo do MSS e do TM. Os diques intrusivos básicos e ultrabásicos foram identificados pelos realces que apresentam no relevo, da mesma forma ocorrendo com alguns poucos corpos pegmatíticos passíveis de discriminação nos produtos de sensoriamento remoto de baixa resolução.

### 3.8 . COBERTURAS TERCIÁRIAS-QUATERNÁRIAS

As coberturas detríticas desenvolvem-se preferencialmente sobre as unidades do subgrupo Paraopeba e no mapa fotogeológico integrado não foram individualizadas.

Os depósitos aluviais pleistocênicos-holocênicos constituem as planícies de inundação que bordejam os principais cursos d'água da área de estudo, e foram facilmente identificados pelas suas características fotolitológicas: textura lisa e tonalidade de cinza médio.

#### 4. ANÁLISE DE FRATURAMENTO

Na extração dos dados estruturais (juntas e falhas) foram analisados os elementos texturais de relevo e drenagem.

No presente trabalho foram utilizados os seguintes critérios:

- *fratura* - este termo foi utilizado de uma forma bem ampla, incluindo qualquer plano de quebra possível de representação nos produtos utilizados de pequena escala. Aqui estão incluídas as foliações cataclásticas, a partir das quais pode se desenvolver um intenso fraturamento.

- *lineações de relevo e drenagem* - este termo foi utilizado segundo as definições de Soares et alii (1982a) e Soares et alii (1982b) como caráter descritivo de feições observadas nas imagens fotográficas e sua correlação com os elementos do terreno.

- *foliamento* - este termo foi utilizado de forma ampla para caracterizar feições lineares, retilíneas e/ou levemente curvas, associadas às formas de relevo e drenagem, observadas nos produtos utilizados.

- *fotolinhamento* - este termo foi utilizado de forma ampla para caracterizar feições alinhadas simples ou compostas, que podem refletir um fenômeno de subsuperfície.

- *juntas* - foram consideradas como juntas as lineações de relevo e de drenagem com extensão máxima de 3,5 km (Northfleet et alii, 1971) e transversais a subparalelas ao acamamento.

- *falhas* - foram consideradas como falhas alinhamentos de relevo e drenagem e tonais, com extensão superior a 3,5 km que segundo Veneziani (1986) podem condicionar a assimetria de relevo e drenagem ou constituir os limites entre extratos rochosos com competência diferente.

Os dados de fraturamento foram estudados a través da delimitação dos feixes de fraturas, da análise qualitativa e quantitativa, e através dos diagramas de rosáceas para as juntas verticais e sub-verticais medidas no campo.

##### 4.1 - FEIXES DE FRATURAS

Na análise dos feixes de fraturas foram determinadas direções preferenciais, levando-se em conta que os principais alinhamentos e zonas fortemente estruturadas, podem indicar tectonismo profundo, mesmo em cinturão de "nappes" (Plicka, 1974).

Segundo Plicka op cit, as zonas de juntas constituem uma concentração de juntas, com alto ângulo de mergulho (verticais a sub-verticais), espaçadas regularmente (mais ou menos paralelas), estendendo-se ao longo de grandes áreas e grandes distâncias e podendo ainda ter grande extensão vertical. As zonas de juntas podem formar conjuntos em uma determinada direção, delineando feições tectônicas, e nos produtos utilizados são as feições mais marcantes e proeminentes.

A análise da distribuição dos feixes de fraturas identificados na área de estudo, mostra a existência de regionalização, e definição

das seguintes seis direções preferenciais de esforços que podem indicar relações genéticas e idades relativas dos eventos evolutivos da região de estudo:

- NS  $\pm$  15<sup>0</sup>, direção atual das grandes falhas de empurrão de alto ângulo na serra do Espinhaço e no Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais a leste, e de antigos falhamentos pré-orogênese Minas-Espinhaço;

- N30<sup>0</sup>E  $\pm$  15<sup>0</sup> e N30<sup>0</sup>W  $\pm$  15<sup>0</sup>, direções que caracterizam principalmente as direções de eixos de dobras e da foliação principal das rochas do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais e o condicionamento de rochas supracrustais de grau metamórfico mais baixo, como as rochas do supergrupo Rio das Velhas;

- N60<sup>0</sup>E  $\pm$  15<sup>0</sup> e N60<sup>0</sup>W  $\pm$  15<sup>0</sup>, direções que caracterizam principalmente o condicionamento do cinturão arqueano Rio das Velhas. A direção N60<sup>0</sup>E  $\pm$  15<sup>0</sup> caracteriza a principal direção atual das rochas do supergrupo Minas na parte sul da área de estudo, na região do Quadrilátero Ferrífero.

- EW  $\pm$  15<sup>0</sup>, direção que condiciona as unidades arqueanas presentes na área de estudo.

##### 4.2 - ANÁLISES QUALITATIVA E QUANTITATIVA DOS FOTOLINEAMENTOS

A análise qualitativa baseia-se na distribuição, intensidade e relação das interseções dos fotolinhamentos. Esta análise permite obter informações sobre a hierarquia dos esforços que atuaram na região, e conseqüentemente obter indicação sobre a relação entre os diversos eventos (inclusive sobre suas idades relativas), que resultaram nos atuais sistemas de fraturas.

A análise individual dos sistemas de fraturas permite tecer considerações sobre um determinado evento tectônico rúptil ou rúpti-dúctil.

Nesta análise procurou-se estudar a relação entre as grandes unidades litoestratigráficas e um determinado sistema de fraturamento, no intuito de se determinar a idade relativa de um determinado evento.

A análise quantitativa dos fotolinhamentos foi processada a partir do tratamento estatístico dos fotolinhamentos para produtos de pequena escala, proposto por Aliyev (1980), que permite o estudo regional dos eventos da tectônica rúptil e rúpti-dúctil.

O método permite ainda estudar os sistemas de fraturas como um todo ou separadamente para uma determinada unidade litoestratigráfica, como também definir os efeitos do controle exercido por falhamentos na distribuição das zonas de juntas.

Os dados obtidos nas análises dos mapas de fotolinhamentos, permitiram algumas considerações a respeito das seis direções definidas para a área de estudo.

A direção NS  $\pm$  15<sup>0</sup>, de reativações múltiplas, com expressão tensional arqueana, é uma das condicionantes do cinturão de rochas verdes Rio das Velhas.

No Proterozóico Inferior (?) a Médio, se-

gundo esta direção, instala-se a bacia Minas-Espinhaço. Esta direção além do rifteamento, proporcionou a instalação de fraturas sinsedimentares no embasamento, representadas pelos diques de quartzitos. Após a orogênese Minas-Espinhaço, ela é reativada durante a sedimentação do grupo Bambuí sob a forma de movimentos epirogenéticos que diferenciaram a bacia Bambuí em altos e baixos estruturais, fato sugerido pela alongação geral NS dos principais corpos de rochas carbonáticas.

Em épocas pós-supergrupo São Francisco, os lineamentos associados a esta direção, caracterizados na época Minas-Espinhaço como falhas de crescimento, foram reativadas como falhas de empurrão de alto ângulo que provocaram o cavalgamento das rochas do supergrupo São Francisco pelas rochas do supergrupo Espinhaço, como mostra a verticalização das rochas dos grupos Macaúbas e Bambuí, ao longo da borda oeste da serra do Espinhaço.

A análise quantitativa dos fotolineamentos relacionados com esta direção, mostrou que esta encontra-se controlada por ela mesma, e em alguns pontos pelas direções EW, NNW e NNE. A análise quantitativa mostrou ainda que esta direção condicional em parte, as direções EW, NNE, NNW e NW.

As direções  $N30^{\circ}E \pm 15^{\circ}$  e  $N30^{\circ}W \pm 15^{\circ}$ , em parte podem ser consideradas como variações da direção  $NS \pm 15^{\circ}$ . Elas são condicionantes das litologias de alto grau metamórfico do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais, na porção oeste da área de estudo, onde se apresentam menos retrabalhadas por eventos tectono-metamórficos posteriores. Caracterizam eixos de dobras, bem como a direção da foliação, principalmente pela predominância de gnaisses bandados, marcantes nas imagens LANDSAT e de radar.

A direção  $N30^{\circ}E \pm 15^{\circ}$  é condicionante também da xistosidade dos supergrupos Rio das Velhas e Minas no Quadrilátero Ferrífero, que possui variações para  $N60^{\circ}E \pm 15^{\circ}$ . Na região de Pêqui-Pitangui-Juatuba a xistosidade do supergrupo Rio das Velhas é condicionada pela direção  $N30^{\circ}W \pm 15^{\circ}$  com variações para  $N60^{\circ}W \pm 15^{\circ}$ .

A direção  $N30^{\circ}W \pm 15^{\circ}$ , como a direção  $NS \pm 15^{\circ}$ , é condicionante dos falhamentos de alto ângulo que afetaram os metassedimentos do supergrupo Espinhaço, principalmente a norte do grande falhamento transcorrente de direção EW, que corta toda a serra do Espinhaço, na altura de Cardeal Mota. Esta direção tem também um controle da xistosidade das rochas do supergrupo Espinhaço. Nas regiões de ocorrência das rochas do supergrupo São Francisco estas duas direções são bem evidenciadas e condicionam a foliação das rochas e o fraturamento associado.

Na análise quantitativa estas direções mostram ser controladas por elas mesmas e pelas direções NS e EW.

As direções  $N60^{\circ}E \pm 15^{\circ}$  e  $N60^{\circ}W \pm 15^{\circ}$  exercem fortes condicionamentos na área de estudo. O cinturão de rochas verdes Rio das Velhas na região de Juatuba-Pitangui está condicionado principalmente pela direção  $N60^{\circ}W \pm 15^{\circ}$ , fato notório pela sua configuração.

Estas direções também condicionam o cinturão arqueano de rochas verdes Rio das Velhas na região do Quadrilátero Ferrífero.

Elas foram reativadas no Proterozóico Inferior (?) a Médio, formando componentes cisalhamentos transcorrentes, resultantes de esforços EW, sendo responsáveis por dobramentos e empurrões no supergrupo Espinhaço e no Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais. Na área de ocorrência do grupo Bambuí, nota-se que a direção  $N60^{\circ}W \pm 15^{\circ}$  é um pouco menos desenvolvida, que a direção  $N60^{\circ}E \pm 15^{\circ}$ , fato compatível com a evolução regional de cavalgamento e metamorfismo mais intenso na parte sudeste do grupo Bambuí (Scholl, 1976a e b).

A análise quantitativa dos mapas de fotolineamentos, mostrou que na época Santa Rita houve uma movimentação tectônica condicionada pelas direções  $NS \pm 15^{\circ}$ ,  $N60^{\circ}E \pm 15^{\circ}$  e  $N60^{\circ}W \pm 15^{\circ}$ , que coincide com a finalização do magmatismo nesta região do Espinhaço. A formação Santa Rita, praticamente, não foi afetada pela intrusão de corpos básicos. Esta atividade tectônica condicionou a área de sedimentação desta formação em duas direções principais:  $N60^{\circ}W \pm 15^{\circ}$  na porção norte da área de estudo e  $EW \pm 15^{\circ}$  na porção sul.

Na análise quantitativa destas duas direções, verificou-se que elas são controladas por elas mesmas, e muito fracamente pelas outras direções.

A direção  $EW \pm 15^{\circ}$  apesar de contar com a menor frequência de ocorrência nos mapas de fotolineamentos, apresenta também um caráter poliativo desde os tempos arqueanos (Inda et alii, 1984), mostrando evidências de movimentos transcorrentes, como pode ser observado em campo. Ela forma geralmente um par conjugado, com deslocamento horizontal, com as fraturas de direção  $N30^{\circ}W \pm 15^{\circ}$ .

A direção  $EW \pm 15^{\circ}$  é uma das condicionantes da bacia Minas-Espinhaço, proporcionando na época da instalação da bacia, fraturas sinsedimentares no embasamento, preenchidas sob a forma de diques sedimentares de direção EW (Sperber, 1975). Causou também ondulações de direção EW e consequentemente variações faciais (Sperber, 1975; Almeida Abreu e Schorsher, 1984) Dessa forma pode ser explicado porque, que a zona de ocorrência das rochas do supergrupo Espinhaço possui larguras diferentes.

O caráter distensivo desta direção é dado ainda pelos inúmeros corpos básicos associados em forma de diques.

Todos os dados discutidos acima, corroboram com a idéia de que as seis direções definidas na área de estudo, são direções muito antigas, com atividades desde épocas arqueanas, anteriores ainda ao tempo Rio das Velhas.

##### 5. CINTILOMETRIA

Os dados cintilométricos da área de estudo não são muito significativos. Os principais resultados da análise destes dados foram:

- um melhor ajuste do contato sul entre as rochas do supergrupo Rio das Velhas e os gnaisses e migmatitos do Complexo Migmatito-Granulí-

tico de Minas Gerais.

- alguns falhamentos são acusados nos perfis por máximos, como nos falhamentos NNW que passam pela região de Pequi e na região de Pará de Minas-Pitangui.

- confirmação dos contatos das rochas do supergrupo Rio das Velhas com os gnaisses e migmatitos do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais na região de Pará de Minas-Pitangui.

- confirmação de algumas falhas de empurrão de alto ângulo, fotointerpretadas.

- indicação de falhamentos ao longo de alinhamentos fotointerpretados.

- confirmação dos contatos das rochas do supergrupo Minas com os gnaisses e migmatitos do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais e com as rochas do supergrupo Rio das Velhas na região do Quadrilátero Ferrífero.

## 6. AEROMAGNETOMETRIA

Os principais resultados da análise dos dados aeromagnéticos foram:

- boa definição das formações ferríferas do supergrupo Rio das Velhas e das sequências Itabiríticas do supergrupo Minas.

- confirmação de falhas transcorrentes fotointerpretadas pelo arrasto dos máximos e mínimos ("drag of magnetic highs and lows").

A integração dos dados da fotointerpretação, da análise dos fotolineamentos com os dados geofísicos além de permitirem definir melhor o posicionamento de algumas unidades litológicas, permitiu também identificar uma série de falhamentos associados às seis direções principais de esforços, definidas neste trabalho.

Para a análise destes falhamentos foram estudados os modelos de Reidel (1929), Moody e Hill (1956), Tchalenko (1970), Khain (1973), Vialon et alii (1976) e Sadowski (1983).

Vialon et alii (1976) e Sadowski (1983 e 1984) apresentaram o modelo de Reidel para zonas de cisalhamento, que definiu quatro famílias de fraturas secundárias, desenvolvidas a partir da associação binária de esforços de compressão e tração.

Sadowski (1983 e 1984) mostrou que dois ou três sistemas de fraturas são encontrados ainda no modelo de Reidel: um sistema paralelo à zona de cisalhamento e um sistema simétrico ao sistema transcorrente antitético de Reidel, em relação à direção de cisalhamento.

Sadowski (1983) efetuou estudos de diversos cinturões de cisalhamento de várias partes do globo terrestre e verificou que a partir do modelo binário de cisalhamento, existe uma associação entre falhamentos inversos e grandes falhas transcorrentes, associados a um mesmo sistema de esforços. Em seus trabalhos no nordeste brasileiro, verificou que a partir dos estudos de deformação associadas a falhas de empurrão, podia-se definir os falhamentos transcorrentes responsáveis pelas estruturas inversas.

Na área de estudo, não foi possível definir sistemas binários de cisalhamento, visto que praticamente as seis direções identificadas definem sistemas de falhas poliativas, tanto de caráter distensivo como de caráter compressivo. Por outro lado, estas direções não são restritas à área de estudo, pois possuem caráter continental, principalmente nas áreas de ocorrência das rochas arqueanas e proterozóicas.

Na tentativa de se definir as principais direções de esforços que atuaram na região de estudo, e o relacionamento genético dos fotolineamentos extraídos dos produtos de sensoriamento remoto com as estruturas da tectônica rúptil aplicou-se o esquema proposto por Reidel na análise destas seis direções, levando-se em consideração as sugestões de Sadowski (1983).

Como resultado desta análise, verificou-se que a direção da falha transcorrente paralela a zona de cisalhamento, varia entre  $N50^{\circ}-80^{\circ}W$ ,  $EW$  e  $N20^{\circ}-40^{\circ}E$ . As direções de esforços determinadas foram: de NE para SW; de E para W; e de SE para NW, fato que vem demonstrar a existência dos movimentos diferenciais e rotacionais de bloco na área de estudo.

A sudeste e a leste da área de estudo, estes esforços foram mais intensos. Provocaram o soerguimento das rochas infracrustais que através de falhas de empurrão foram colocadas em contato com as rochas de mais baixo grau metamórfico. Este soerguimento a sudeste e a leste provocou um basculamento para norte, noroeste e oeste, sendo uma das evidências mais fortes deste fato, a predominância de rochas supracrustais (gnaisse e xistos) a norte e a oeste da área de estudo.

Este tectonismo compressivo foi ainda responsável pelos seguintes eventos:

- os esforços de direção SE-NW, em decorrência do soerguimento a sul, foram mais ativos, propiciando o arrasto dos sedimentos Minas para NW e a formação de empurrões, que jogaram os metassedimentos Minas por cima das rochas do supergrupo Rio das Velhas e do embasamento gnáissico. Parte das rochas do supergrupo Minas foram também jogadas sobre as rochas do supergrupo Espinhaço, como por exemplo na porção sul da serra das Cambotas. Este fato fica bem evidenciado na análise quantitativa dos fotolineamentos, que indicam uma posição alóctone para os metassedimentos Minas do Quadrilátero Ferrífero e da região de Rio Piracicaba. Os resultados do levantamento aeromagnético de Minas Gerais e Espírito Santo mostraram que na região de Ponte Nova, sul de Itabira e entre Curvelo e Governador Valadares são reconhecidas áreas anômolas, extensas, que segundo Bosum (1983) devem ser procuradas em profundidade. Essas anomalias, segundo este autor, indicam uma elevação do cristalino magnético nessas regiões, que pode corresponder inteiramente a uma elevação do cristalino geológico profundo.

- o soerguimento da crosta a NE, em consonância, com os soerguimentos a SE e E acarretou a formação de falhas de empurrão de direção NNE a NS, com vergência para leste, descritas por Schorscher (1975) na região de Itabira-Santa Maria de Itabira, que para norte, devido aos cho-

ques de esforços de leste para oeste e de sul para norte, evoluíram para componentes cisalhan-tes transcorrentes. A esta falha de empurrão são associadas falhas transcorrentes destrais.

- o caráter distensivo observado na região de estudo, relaciona-se com as fraturas de direção N20°E e N30°W. Com esta última encontram-se associados corpos basálticos relacionados a processos pós-tectônicos (Schorsch, 1975) distensivos de idade provável, mesozóica.

## 7. CONCLUSÕES

- 1 - A utilização conjunta dos produtos de sensoriamento remoto, dos dados de levantamentos aerocintilométricos e aeromagnetométricos e de dados bibliográficos pré-existentes e de campo, atendem de maneira satisfatória aos objetivos propostos. (Figura 1)
- 2 - A análise fotogeológica aliada aos trabalhos de campo e aos dados geofísicos, permitiu uma melhor caracterização das principais unidades litoestratigráficas-estruturais, sendo o resultado mais significativo a extensão de maneira contínua do supergrupo Rio das Velhas desde o Quadrilátero Ferrífero até a região de Pitangui.
- 3 - As análises dos fotolocalamentos mostraram que as direções próximas a NS, NNE, NNW, NW, NE e EW condicionaram as sequências rochosas da região de estudo, desde o arqueano até as atividades termotectônicas do Fanerozóico.
- 4 - A reativação de caráter distensivo das direções NW e NE permitiram a instalação do cinturão de rochas verdes Rio das Velhas. Em tempos pós-Bambuí estas direções tiveram um papel importante na formação dos empurrões e dobramentos no Espinhaço.
- 5 - A reativação das direções NS e EW no Proterozóico Inferior a Médio, permitiu a instalação da bacia Minas-Espinhaço. A direção NS teve um papel importante na formação dos diques de quartzitos tanto no Espinhaço como no embasamento. A direção EW além de ser também responsável pela formação de diques de quartzitos, controlou toda a formação de diques intrusivos na região do Espinhaço e do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais.
- 6 - A reativação das direções NNE e NNW foi responsável pela movimentação diferencial de blocos na parte leste da área de estudo.
- 7 - Os feixes de fraturas e os fotolocalamentos mostraram uma associação genética e geométrica com os falhamentos mapeados, mostrando que suas origens estão relacionadas com as reativações múltiplas, condicionando o relevo e a drenagem da área de estudo, como reflexos das estruturas profundas.
- 8 - Os soerguimentos crustais do embasamento a SE e E mais intensos que a NE da área de estudo, foram responsáveis pela posição autóctone das rochas do supergrupo Minas, na região do Quadrilátero Ferrífero e Rio Piracicaba, configurada pelo padrão de fraturamento distinto e pelo controle que a direção NE exerce sobre as demais direções.

9 - o padrão de fraturamento das rochas do supergrupo Minas ao longo da borda leste da serra do Espinhaço mostra um posicionamento autóctone a para autóctone destas rochas.

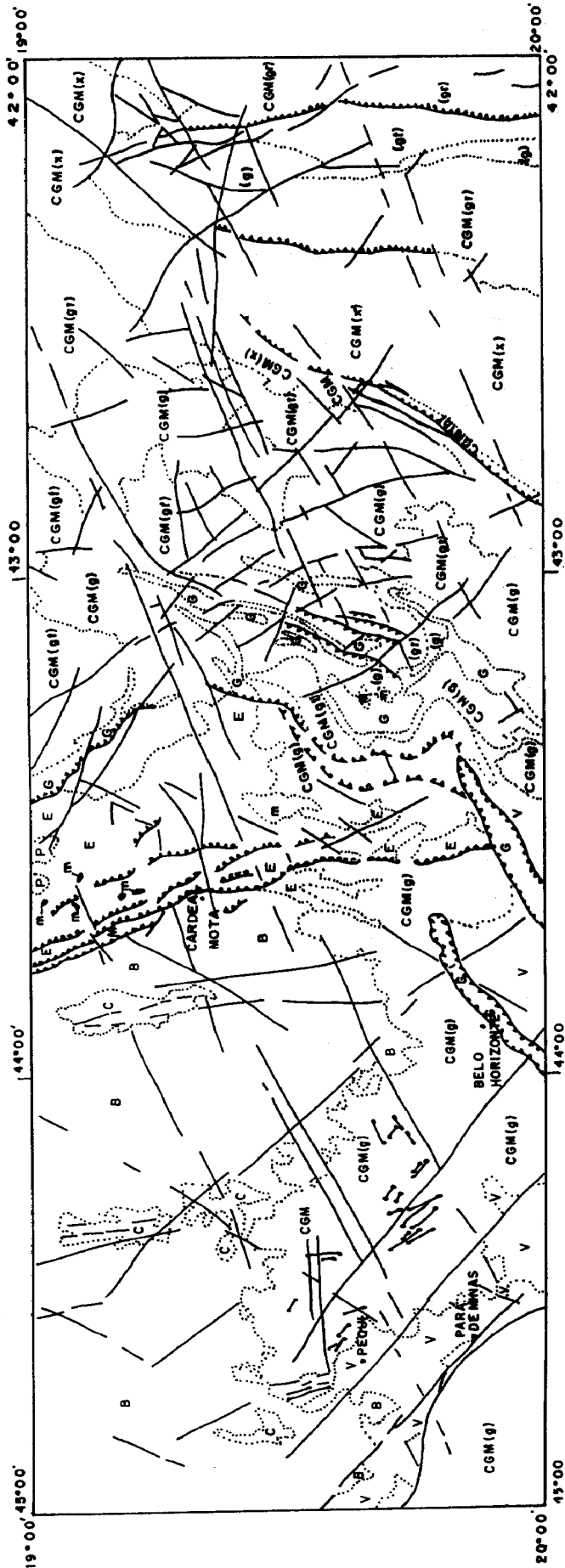
10 - Os dados da análise dos fotolocalamentos mostraram padrões característicos para a formação Santa Rita, indicando uma certa discordância estrutural entre esta formação e as unidades inferiores, caracterizando desta forma o final dos eventos magmáticos no Espinhaço Meridional.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

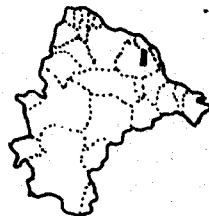
- ALIYEV, A. Regional fracturing of Pamirs and its metallogenic significance. Doklady Akademiy Nauk SSSR, 250:90-93, Moscow, 1980.
- ALMEIDA ABREU, P.A.; SCHORSCHER, H.D. Archean basement configuration and influences of the lower Proterozoic Espinhaço Supergroup in Minas Gerais, Brasil. International Geological Congress, 27. Abstracts, II (sections 04 and 05):248. Moscow, 1984.
- BOSUM, W. O levantamento aeromagnético de Minas Gerais e Espírito Santo e sua sequência quanto a estrutura geológica. Revista Brasileira de Geociências, 3(4):149-159. São Paulo, 1976.
- CONDIE, R.C. Archean greenstone belts. Elsevier Scientific Pub. Co. 442 pp. Holanda, 1981.
- DORR, J.V.N.; GAIR, J.E.; POMERENE, J.B.; RYNEARSON, G.A. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Avulso 81, DNPM/DFPM, 31 pp. Rio de Janeiro, 1957.
- FONTES, C.Q.; NETTO, C.; COSTA, M.R.A. BALTAZAR, O.F.; SILVA, S.L.; VIEIRA, V.S. Projeto Jequitinhonha. Relatório Final, 12 v. Belo Horizonte, 1978.
- HETTICH, M.A. A glaciação proterozóica no norte de Minas Gerais. Congresso Brasileiro de Geologia, 29. Resumos:22-23. Belo Horizonte, 1976.
- INDA, H.A.V.; SCHORSCHER, H.D.; DARDENE, M.A.; SCHOBENHAUS, C.; HARALIY, N.L.E.; BRANCO, P.C.A.; RAMALHO, R. O craton de São Francisco e a faixa de dobramentos Araçuaí. Geologia do Brasil. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Adjacente Oceânica, Incluindo Depósitos Minerais. Escala de 1:2.500.000, 1:193-248. Brasília, 1984.
- KHAIN, V.E. Obschaya Geotektonika. 510 pp. Moscou, 1973.
- MOODY, J.D.; HILL, M.J. Wrench fault tectonics. Geol. Soc. Amer. Bul., 67:1207-1246. 1956.
- PLICKA, M. Observations on joint zones in Moravia, Czechoslovakia. Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics, 5:279-289. Utah, 1974.
- RIEDEL, W. Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen Central bl. F. Min. Geol. und Pal., 8:354-368. 1929.
- SADOWSKI, G.R. Sobre a Geologia Estrutural de Cinturões de Cisalhamentos Continentais. 108 pp. São Paulo, 1983 (Tese de Doutorado).



Esboço Geológico da região do Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e Adjacências



LOCALIZAÇÃO



- LEGENDA**
- Proterozóico Superior**  
 B - Grupo Bambuí (c) calcáreo  
 M - Grupo Macaúbas
- Proterozóico Inferior a Médio**  
 G - Supergrupo Minas  
 E - Supergrupo Espinhaço
- Arqueano**  
 V - Supergrupo Rio das Velhas  
 P - Supergrupo Rio Paraúna  
 CGM - Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais  
 (x) xisto; (q) quartzito; (g) gnaisses  
 (gt) granitóides; (gr) granulitos
- Contatos geológicos  
 - Falhas indiscriminadas  
 - Falhas de empurrão  
 - diques básicos e ultrabásicos  
 - rochas magmáticas intrusivas  
 - cidades

Figura 1.

- SADOWSKI, G.R.; SOUZA, A.P.; BERGMANN, M.; BERTACHINI, A.C.; ANGELI, N. Análise Estrutural Preliminar ao Longo de uma Seção Transversal ao Sinclinal da Moeda. Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Anais, 7:3393-3399. Rio de Janeiro, 1984.
- SCHOLL, W.U. Estromatólitos (connophyton) em Dolomitos do grupo Bambuí. Congresso Brasileiro de Geologia, 29. Resumos. Belo Horizonte, 1976a.
- SCHOLL, W.U. Estratigrafia do grupo Bambuí, na Parte Sudeste da Bacia do São Francisco. Congresso Brasileiro de Geologia, 29. Resumos. Belo Horizonte, 1976b.
- SCHORSCHER, H.D. Entwicklung des Polijmetamorphen Prakambrischen Raumes Itabira, Minas Gerais, Brasilien. 304 pp. Heidelberg, 1975. (Tese de Doutorado).
- SOARES, P.C.; BARCELOS, S.M.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; MENEZES, P.R. Lineamentos em Imagens de LANDSAT e de Radar e suas Implicações no Conhecimento da Bacia do Paraná. Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2. Anais, 1:143-156. Brasília, 1982a.
- SOARES, P.C.; REDALLI, R.; GUERRA, S.M.S.; BERRINI, L.C. Análise Morfoestrutural em Fotos Aéreas: Aplicação na Prospecção de Hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2. Anais, 1:157-168. Brasília, 1982b.
- SPERBER, M. V. Geologie des Prakambrian am Sud-West-Rand der Serra do Cipó (Serra do Espinhaço-Minas Gerais-Brasilien). 1975. (Tese de Doutorado).
- TCHALENKO, J.S. Similarities Between Shear Zones of Different Magnetudes. Geol. Soc. Amer. Bull. 81:1625-1640. 1970.
- VENEZIANI, P. Análise de movimentos da Tectônica Rúptil e Rúptil-Dúctil Através da Interpretação de Produtos de Sensores Remotos na Região do Espinhaço Meridional (MG): Uma Correlação com os Processos Evolutivos. 175 pp. São Paulo, 1986. (Tese de Doutorado).
- VIALON, P.; RUHLAND, M.; BROLIER, J. Elements des Tectonique Analytique. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 57(1):74-96. 1973.